

GNSS 拒止下低空无人机 导航与资源分配优化



Navigation and Resource Allocation Optimization for GNSS-Denied Low-Altitude Wireless Networks

金海佳/Jin Haijia, 袁伟杰/Yuan Weijie, 伍军/Wu Jun

(南方科技大学, 中国 深圳 518055)
(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260422.1814.007>

网络出版日期: 2026-04-23

收稿日期: 2026-01-30

摘要: 针对低空无线网络 (LAWN) 在全球导航卫星系统 (GNSS) 拒止与机载射频资源受限下面临的挑战, 研究无人机自主到站及部署后受限资源下的服务问题。在导航阶段, 基于地面参考锚点的方位几何特征, 提出纯角度制导策略, 使无人机在无卫星导航信号辅助下精确抵达目标阵位。在通信阶段, 针对机载发射功率与射频链路受限的问题, 以最大化系统有效服务用户数为目标, 构建联合用户调度与波束赋形的资源分配模型, 并提出一种基于交替优化 (AO)、逐次凸逼近 (SCA) 和半定松弛 (SDR) 的高效算法。仿真实验验证了该方案的有效性: 导航算法能以递减的角度误差实现可靠的目标捕获, 且联合资源分配策略在不同功率预算与速率门限下显著提升了系统的服务性能。

关键词: LAWN; GNSS 拒止; 用户调度; 波束赋形

Abstract: Addressing the challenges of global navigation satellite system (GNSS) denial and constrained onboard radio frequency resources in low-altitude wireless networks (LAWNs), this work investigates autonomous drone positioning and subsequent multi-user communication services under limited resources. In the navigation phase, an angle-only guidance strategy is proposed based on bearing geometry from ground reference anchors, enabling the drone to precisely reach the target location without satellite navigation signals. In the communication phase, to tackle the limitations of onboard transmit power and radio frequency links, a joint user scheduling and beamforming resource allocation model is formulated to maximize the number of effectively served users. An efficient algorithm based on alternating optimization (AO), successive convex approximation (SCA), and semidefinite relaxation (SDR) is developed. Simulation results validate the effectiveness of the proposed scheme: the navigation algorithm achieves reliable target acquisition with decreasing angle errors, and the joint resource allocation strategy significantly improves system service performance under various power budgets and rate thresholds.

Keywords: LAWN; GNSS-denied; user scheduling; beamforming

引用格式: 金海佳, 袁伟杰, 伍军. GNSS 拒止下低空无人机导航与资源分配优化 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 36-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

Citation: Jin H J, Yuan W J, Wu J. Navigation and resource allocation optimization for GNSS-denied low-altitude wireless networks [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 36-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

借助无人机和电动垂直起降 (eVTOL) 飞行器等空中平台, 低空无线网络 (LAWN) 构建了一种灵活且可快速部署的通信范式, 能够打破传统地面基础设施的限制^[1]。得益于三维空间中的高机动性以及以视距 (LoS) 为主的空对地 (A2G) 链路特性, LAWN 可为应急响应、临时热点分流及基础设施匮乏区域的公共安全行动等动态、时延敏感任务, 提供自适应且可靠的下行覆盖^[2-3]。然而, 与地面基站相比, 空中平台在发射功率、射频链路并发能力、载荷与能量供给等方面均面临更严格的约束, 机载无线资源的紧缺使

得如何高效进行资源分配与用户调度成为 LAWN 实现可持续多用户服务的核心问题之一^[4]。

围绕 LAWN 中的无人机通信, 现有研究已从资源分配与用户调度等角度展开大量探索。在资源分配方面, 相关工作通常围绕发射功率和时频资源等维度展开设计, 以提升总体吞吐、覆盖效率或服务稳定性, 并在不同场景约束下讨论资源配置对 LAWN 通信性能的影响^[5]。用户调度旨在从过载的候选用户池中选出最佳服务子集, 从而在有限的机载射频资源约束下, 有效抑制多用户干扰并保障通信质量。例如, 文

献[6]针对空地一体化网络中的隐蔽传输场景,提出了一种联合鲁棒波束赋形与覆盖优化的调度框架,在满足隐蔽性约束及卫星回传链路中断概率限制的前提下,最大化系统有效服务用户规模。此外,机载多天线阵列带来的空间复用增益与无人机三维高机动优势相融合,使得波束赋形成为优化网络拓扑及抑制同频干扰的关键技术手段。针对无人机赋能的自适应通感一体化系统,文献[7]构建了交替迭代优化的联合设计架构,在灵活分配感知时隙、严格保障通信与感知双业务服务质量的约束条件下,通过协同调控通信波束、感知波束及无人机运行轨迹,实现了系统平均吞吐量的最优提升。尽管上述工作从不同维度推动了低空无线网络的发展,但大多默认无人机能够可靠完成导航与部署,较少关注其前提条件。特别是在全球导航卫星系统(GNSS)拒止等类似环境下,无人机首先面临的是如何依靠有限感知信息实现稳定自主导航,而这也是后续任务执行与通信资源分配得以开展的基础。

为此,要在实际的LAWN中实现稳定的下行链路运行,必须依赖可靠的无人机导航控制,以维持精确的状态感知与高保真的运动执行。现有的导航方案主要可分为基于绝对位置和基于相对状态两大类^[8]。前者依赖GNSS或其他外部定位设施提供的全局位置测量,在信息准确且连续可用时可实现直接的制导与跟踪。然而,在LAWN应用场景中,GNSS信号极易受遮挡、多径效应及恶意干扰的影响,导致状态估计出现偏差或中断,进而引发控制失稳及性能恶化^[9]。相比之下,基于相对状态的方法利用相对于锚点或地标的测量值(如相对位置、方位、距离或角度)来调节无人机运动,从而降低了对全局定位的依赖。然而,此类方法通常要求参考特征具有持续的可观性,且易受测量模糊性及不利几何构型的影响。此外,除非辅以额外的感知手段与可观性条件,否则其稳定性和收敛性往往受到限制^[10]。

基于上述研究背景,本文聚焦LAWN中GNSS拒止场景下的低空无人机任务执行问题,研究无人机如何在缺乏卫星导航支撑的条件下可靠抵达指定目标阵位,并进一步完成面向已知地面用户的下行传输任务。针对这一特定场景,本文首先设计了一种适用于GNSS拒止环境的纯角度制导导航方法,利用无人机与地面参考锚点之间的方位几何关系实现自主导航与目标捕获。在此基础上,面向多用户下行传输的业务需求,综合考虑机载发射功率上限与用户最低速率约束,制定了针对性的资源分配与用户调度策略,最终实现无人机

在目标阵位处覆盖范围的最大化。

1 系统模型

本文考虑的LAWN场景如图1所示。系统由一架搭载 N 根天线的无人机以及 M 个单天线地面用户(GU)组成。为刻画系统中各节点的空间几何关系,定义无人机的三维位置向量为 $\mathbf{u} = [x^u, y^u, z^u]^T$, GU $_m$ 的位置为 $\mathbf{b}_m = [x_m^b, y_m^b, 0]^T$ 。系统运行过程划分为两个按序执行的阶段:第一阶段为自主导航阶段,在GNSS拒止环境下,无人机仅依赖纯角度几何观测信息进行自主导航,并逐步收敛至预设目标位置;第二阶段为下行通信阶段,当无人机到达目标阵位后,其作为空中基站为地面用户集合 $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ 提供下行通信服务。考虑到机载无线资源受限,无人机通常难以同时为全部GU提供服务,因此引入用户调度机制。具体而言,设 $K \leq M$ 为系统可同时支持的最大服务用户数,并从中选择一个子集 $\mathcal{K} \subseteq \mathcal{M}$,满足 $|\mathcal{K}| = K$,作为实际被服务的用户集合。下文将依次给出无人机的导航动力学模型以及基于调度集合 \mathcal{K} 的下行通信链路模型。

1.1 导航动力学模型

在自主导航阶段,无人机的控制目标是在环境不确定性存在的情况下,实现从初始位置到目标阵位的收敛¹。无人机运动学行为可由受扰单积分器模型描述^[11]为:

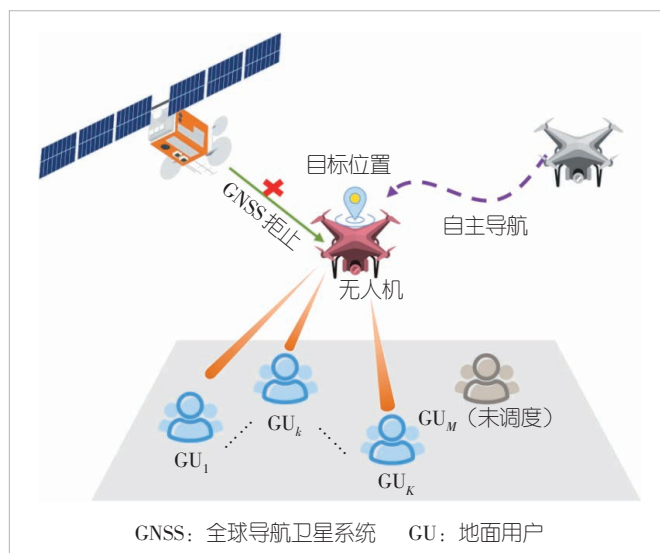


图1 GNSS拒止环境下无人机导航与下行通信场景

1 目标部署点由任务区域覆盖需求预先设定,本文不研究部署位置优化,仅关注无人机在GNSS拒止条件下如何可靠抵达该部署点。

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\mu}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}(t) \in \mathbb{R}^3$ 为控制输入向量。考虑到低空环境的复杂性, 引入有界扰动项 $\mathbf{n}(t) \in \mathbb{R}^3$, 用于刻画风场扰动、执行机构误差以及感知噪声等综合影响。为解决 GNSS 拒止条件下的定位基准问题, 系统从 GU 集合 \mathcal{M} 中选取 3 个非共线的地面节点作为位置状态已知的导航参考锚点, 其集合记为 $\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^3$, 其中 $\mathbf{g}_i = [x_i^g, y_i^g, 0]^T$ 。

1.2 下行通信模型

当无人机完成阵位部署后, 系统随即进入下行通信阶段。我们假设不存在直接的空地通信链路, 并且从无人机至 GU 的信道包含 LoS 和非视距 (NLoS) 两部分, 即信道 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^N$ 可以按照 Rician 衰落信道建模为^[12]:

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\beta_0 d_k^{-2}} \left(\sqrt{\frac{\kappa_k}{\kappa_k + 1}} \mathbf{h}_k^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_k + 1}} \mathbf{h}_k^{\text{NLoS}} \right) \quad (2)$$

其中, d_k 为无人机和 GU_k 之间的距离, β_0 为参考信道增益, κ_k 为对应链路的 Rician 因子。 $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}} \in \mathbb{C}^N$ 表示信道 LoS 分量, 进一步写为 $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}} = \alpha(\theta_k)$, 其中 $\alpha(\theta_k)$ 为均匀线阵的阵列导向向量, 表达为:

$$\alpha(\theta_k) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d^s}{\lambda} \cos \theta_k}, \dots, e^{j2\pi \frac{d^s}{\lambda} (N-1) \cos \theta_k} \right]^T \quad (3)$$

一方面, d^s 表示相邻阵元之间的间距, λ 为载波波长, θ_k 代表对应的物理离开角 (AoD), 由节点间的几何拓扑唯一确定, 即 $\cos \theta_k = z^u / \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_k\|$ 。另一方面, $\mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}$ 表示散射引起的 NLoS 分量, 其元素服从零均值单位方差的循环对称复高斯分布。此外, 考虑到在实际场景中难以获得完美的信道状态信息 (CSI), 本文将无人机到自 GU 的信道表述为最小均方误差 (MMSE) 信道估计误差模型 $\mathbf{h}_k = \hat{\mathbf{h}}_k + \boldsymbol{\omega}_k$, 其中, $\hat{\mathbf{h}}_k$ 为估计信道, $\boldsymbol{\omega}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_\omega^2)$ 为对应的信道估计误差项。在多用户下行传输场景下, GU_k 的可达速率 R_k 由其信干噪比 (SINR) 决定, 具体表示为:

$$R_k = \log \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \in \mathcal{K}, i \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right) \quad (4)$$

其中, \mathbf{w}_k 为波束赋形向量, σ^2 表示接收端噪声功率。

2 GNSS 拒止下的导航策略设计

针对 GNSS 拒止的受限场景, 我们提出一种仅依赖纯角度几何量测的自主导航策略。该方法的核心思想在于利用多

锚点构成的几何拓扑约束, 引导无人机从当前位置 $\mathbf{g}_0 = \mathbf{u}$ 收敛至目标位置 $\mathbf{g}_0^* = \mathbf{u}^*$ 。定义任意两个节点 \mathbf{g}_i 与 \mathbf{g}_j 之间的单位视线向量为:

$$\mathbf{r}_{ij} = \frac{\mathbf{g}_j - \mathbf{g}_i}{\|\mathbf{g}_j - \mathbf{g}_i\|}, \quad i, j = 0, 1, 2, 3, \quad i \neq j \quad (5)$$

基于此, 任意 3 点构成的空间内角 $\rho_{jil} \in (0, \pi)$ 可表示为:

$$\rho_{jil} = \arccos(\mathbf{r}_{ij}^T \mathbf{r}_{il}), \quad i, j, l = 0, 1, 2, 3, \quad \text{且互不相同} \quad (6)$$

为了仅通过角度信息实现对无人机三维位置的唯一确定与控制, 需要分析位置与角度约束的映射关系。如图 2 所示, 单一的角度约束 ρ_{012} 将无人机的位置限制在以 \mathbf{g}_1 为顶点、以向量 $\overrightarrow{\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2}$ 为轴线的旋转圆锥面 $\mathcal{C}_1(\rho_{012})$ 上。同理, 角度 ρ_{021} 确定了另一以 \mathbf{g}_2 为顶点的圆锥面 $\mathcal{C}_2(\rho_{021})$ 。这两个圆锥面的交集 $\Gamma = \mathcal{C}_1(\rho_{012}) \cap \mathcal{C}_2(\rho_{021})$ 在空间中表现为一条一维曲线。为实现三维位置的唯一确定, 需要引入第 3 个独立约束, 即地平面 \mathcal{P}_g 与由无人机 \mathbf{g}_0 、 \mathbf{g}_1 和 \mathbf{g}_2 构成的平面 \mathcal{P}_u 之间二面角 ρ_p 。由此构成的一组角度量可以形成完备的广义坐标。

基于上述几何机理, 导航问题可转化为角度误差的渐近调节问题, 其控制目标表述为:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_{012}(t) - \rho_{012}^*) = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_{021}(t) - \rho_{021}^*) = 0 \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_p(t) - \rho_p^*) = 0 \quad (9)$$

其中, $\{\rho_{012}^*, \rho_{021}^*, \rho_p^*\}$ 为目标参考值。为了实时计算反馈误差, 二面角 $\rho_p(t)$ 可通过平面法向量计算得到:

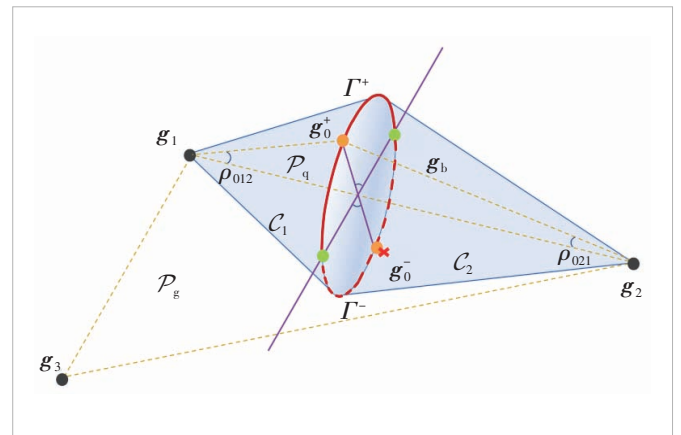


图 2 基于角度量测的无人机导航约束与几何关系分析

$$\rho_p(t) = \begin{cases} \arccos(\mathbf{c}_u^T(t)\mathbf{c}_g), & \mathbf{r}_{10}^T(t)\mathbf{c}_g > 0 \\ -\arccos(\mathbf{c}_u^T(t)\mathbf{c}_g), & \text{其他情况} \end{cases} \quad (10),$$

其中, $\mathbf{c}_u(t)$ 与 \mathbf{c}_g 分别为平面 \mathcal{P}_u 和 \mathcal{P}_g 的单位法向量:

$$\mathbf{c}_u(t) = \frac{\mathbf{r}_{20}(t) \times \mathbf{r}_{21}}{\|\mathbf{r}_{20}(t) \times \mathbf{r}_{21}\|}, \mathbf{c}_g = \frac{\mathbf{r}_{23} \times \mathbf{r}_{21}}{\|\mathbf{r}_{23} \times \mathbf{r}_{21}\|} \quad (11).$$

为实现上述GNSS拒止下自主导航目标,我们采用如下角度误差反馈控制策略^[11]:

$$\boldsymbol{\mu}(t) = (\rho_{012}(t) - \rho_{012}^*)\mathbf{r}_{02}(t) + (\rho_{021}(t) - \rho_{021}^*)\mathbf{r}_{01}(t) - (\rho_p(t) - \rho_p^*)(\mathbf{r}_{01}(t) \times \mathbf{r}_{02}(t)) \quad (12),$$

其中,前两项利用平面内视线向量 $\mathbf{r}_{02}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{01}(t)$ 分别对两个圆锥面约束误差进行比例矫正,第3项则沿平面法向 $\mathbf{r}_{01}(t) \times \mathbf{r}_{02}(t)$ 施加控制力矩以调节二面角误差。3项控制分量相互正交或近似解耦,共同保证了无人机在GNSS拒止环境下收敛至目标阵位。

3 联合用户调度与波束赋形设计

当无人机成功自主导航至预设目标位置后,系统随即进入下行通信阶段。本节在满足下行链路服务质量(QoS)约束及机载发射功率预算的前提下,联合优化用户调度策略与波束赋形设计,可以使系统能够同时支持的有效服务用户数量最大化。相应的联合优化问题建模如公式(13)。

$$\begin{aligned} \max_{\mathcal{K}, \{\mathbf{w}_k\}} & |\mathcal{K}| \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } R_k \geq R_k^{\text{th}}, \forall k \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (13),$$

其中,约束(P1-C1)施加了总功率限制, P_{\max} 代表无人机机载射频模块所允许的最大发射功率预算。约束(P1-C2)旨在保障被调度用户的QoS,其接收速率必须不低于预设的最低门限 R_k^{th} ,确保数据的可靠解调。问题(P1)本质上是一个混合整数非线性规划(MINLP)问题。一方面,用户子集 \mathcal{K} 的选择引入了离散组合优化,其搜索空间随用户规模 M 呈指数级增长;另一方面,波束赋形向量与用户调度决策高度耦合,同时QoS约束具有非凸的分式结构,使得问题整体难以直接求解。

为便于后续优化,我们首先引入二元指示向量 $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_M]$,其中 $\eta_m \in \{0,1\}$ 。具体来说, $\eta_m = 1$ 表示 GU_m 被调度, $\eta_m = 0$ 表示未被调度。由此,问题(P1)可等价

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\eta}, \{\mathbf{w}_m\}} & \|\boldsymbol{\eta}\|_0 \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \mathbf{w}_m^H \mathbf{w}_m \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } R_m \geq \eta_m R_m^{\text{th}}, \forall m \in \mathcal{M} \\ & \text{C3: } \eta_m \in \{0,1\}, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (14).$$

该问题仍为非凸MINLP。为此,本文采用交替优化(AO)框架,将其分解为用户调度与波束赋形两个子问题迭代求解。首先对于给定的波束赋形向量,用户调度的问题可写为:

$$\text{(P3)} \quad \max_{\boldsymbol{\eta}} \|\boldsymbol{\eta}\|_0 \quad \text{s.t. (P2 - C2), (P2 - C3)} \quad (15).$$

首先,将离散约束(P2-C3)等价转化为连续形式:

$$0 \leq \eta_m \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (16),$$

$$\eta_m - \eta_m^2 \leq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (17).$$

由于约束(17)非凸,本文采用逐次凸近似(SCA)方法,第 t_1 次迭代点 $\eta_m^{t_1}$ 处对其进行一阶泰勒近似,得到:

$$(\eta_m^{t_1} - \eta_m)^2 + \eta_m - \eta_m^2 \leq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (18).$$

对于任意 $\eta_m \in \{0,1\}$,公式(18)左侧恒大于零,导致可行域为空。为此,引入罚函数法,将其作为惩罚项移入目标函数,构造如公式(19)的等价优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\eta}} & \sum_{m \in \mathcal{M}} \eta_m - \xi \sum_{m \in \mathcal{M}} [(\eta_m^{t_1})^2 - 2\eta_m^{t_1}\eta_m + \eta_m] \\ \text{s.t.} & \text{C1: (P2 - C2)} \end{aligned} \quad (19),$$

其中 $\xi \gg 0$ 为惩罚因子。该问题在每次迭代中均可利用CVX等标准凸求解器高效求解,通过迭代更新 $\boldsymbol{\eta}$,最终收敛至满足二元特性的可行解。

固定调度策略后,原联合优化问题退化为波束赋形设计问题:

$$\text{(P5)} \quad \text{Find } \{\mathbf{w}_m\} \quad \text{s.t. (P2 - C1), (P2 - C2)} \quad (20).$$

定义半正定波束赋形协方差矩阵 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H, \forall m \in \mathcal{M}$ 以及信道相关矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_m = \hat{\mathbf{h}}_m \hat{\mathbf{h}}_m^H, \forall m \in \mathcal{M}$, (P5)可等价重构为:

$$\begin{aligned} \text{(P6)} & \text{Find } \{\mathbf{W}_m \succeq 0\} \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \text{tr}(\mathbf{W}_m) \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } \text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_m \mathbf{W}_m) - \gamma_m^{\text{th}} \sum_{i \in \mathcal{M}, i \neq m} \text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_m \mathbf{W}_i) \geq \gamma_m^{\text{th}} \sigma^2, \forall m \in \mathcal{M} \\ & \text{C3: } \text{Rank}(\mathbf{W}_m) \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (21),$$

其中, $\gamma_m^h = 2^{R_k^h - 1}$ 。此时, 问题 (P6) 的非凸性完全源于秩-1约束 (P6-C3)。为了获得可解的凸问题, 我们采用半定松弛 (SDR) 方法, 忽略秩约束^[13]。松弛后的优化问题描述为:

$$(P7) \text{ Find } \{W_m \succeq 0\} \text{ s.t. (P6 - C1), (P6 - C2) (22)}.$$

显然, 问题 (P7) 是一个标准的半正定规划 (SDP) 问题, 利用现有的凸优化工具箱即可高效求解。在获得最优解 $\{W_m^*\}$ 后, 需检查其秩属性。若存在高秩解, 需采用高斯随机化技术从 W_m^* 中提取近似最优的可行波束向量, 以确保满足原问题的秩-1约束^[13]。最后, 在固定单组变量后, 分别求解用户调度和波束赋形子问题, 并对两组变量交替迭代优化, 直至收敛。总体算法如算法 1 所示。由于在求解每个子问题时均获得了最优解或其紧致上界, 目标函数值在迭代过程中是非递减的。此外, 由于系统服务的用户数量受限于总数 M , 目标函数具有有限的上界。因此, 根据单调有界收敛定理, 可保证算法 1 收敛至一个稳定的次优解。该算法的计算复杂度主要取决于凸子问题的内点法求解过程, 从而保证了多项式级的计算复杂度。

算法 1 基于交替优化的用户调度和波束赋形总体算法

输入: 迭代次数 $t=0$, 初始变量 $\eta^t, \{w_m^t\}$, 最大迭代次数 t_{\max} 和收敛阈值 ϵ
 输出: $\eta, \{w_m\}$

1. 给定 $\{w_m^t\}$, 利用逐次凸近似, 求解 (P3), 更新调度策略 η^{t+1}
2. 基于 η^{t+1} , 求解 (P5), 更新波束向量 $\{w_m^{t+1}\}$
3. 更新 $t = t + 1$, 并重复步骤 1、步骤 2 直到目标函数值的相对增加量低于 ϵ 或 $t > t_{\max}$

4 仿真实验及分析

本节中, 我们通过仿真验证所提出的在 GNSS 拒止下无人机导航以及联合用户调度与波束赋形算法的有效性。除非另有说明, 我们将系统参数设置如下。无人机初始位置为 $u_0 = [10, 10, 80]^T$ m, 目标位置为 $u^* = [100, 80, 120]^T$ m。3 个非共线 GU 作为地面锚点参考节点坐标为 $g_1 = [20, 10, 0]^T$ m, $g_2 = [140, 30, 0]^T$ m, $g_3 = [70, 130, 0]^T$ m。地面用户总数为 $M = 22$ 。参考距离 1 m 处的信道功率增益取 $\beta_0 = -60$ dB。GU 处的噪声功率设为 $\sigma^2 = -110$ dBm。无人机天线相邻阵元间距设为 $d^s = \lambda/2$, 天线数为 $N_t = 32$ ^[12]。在仿真中, 我们首先基于方位角量测评估无人机的目标到达性能, 研究角度误差的收敛过程。导航阶段的目标在于保障无人机可靠到达预定部

署点, 从而为后续资源分配提供有效的空间支撑。随后, 在目标阵位处评估下行通信性能, 重点考察在不同发射功率预算 P_{\max} 与速率门限 R_k^h 下系统可调度的有效服务用户数量。

图 3 和图 4 展示了 GNSS 拒止条件下所提出的角度测量导航策略的性能结果。图 3 给出了无人机从初始位置到目标阵位的三维运动轨迹, 同时标注了 3 个位置已知的地面锚点, 用于提供方位角几何参考。可见, 无人机的航迹在水平面内逐步向目标点靠拢, 并在飞行过程中同步完成高度方向的调整, 最终到达预设目标位置。这说明仅利用角度几何约束即可形成有效的导航引导, 从而在缺乏卫星定位的情况下仍可实现可靠的目标到达。

图 4 进一步刻画了角度约束误差的动态收敛过程, 其中

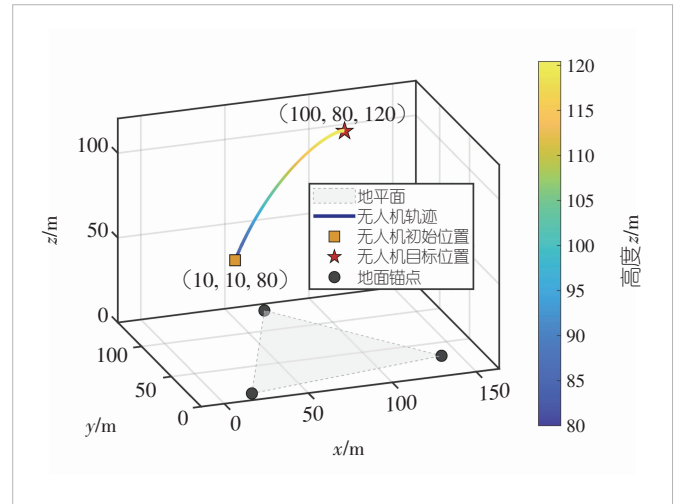


图 3 全球导航卫星系统拒止下的无人机导航轨迹

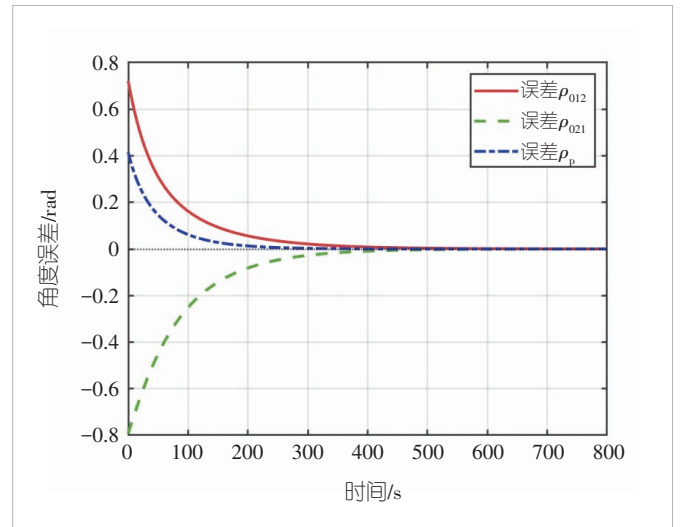


图 4 基于方位角量测的角度误差收敛性能

分别对应于两组空间内角约束 ρ_{012} 、 ρ_{021} 以及二面角约束 ρ_p 。可以看出,各误差项在初始阶段幅值较大,随后在反馈控制作用下快速衰减,并在中后期逐渐逼近零。同时,不同误差分量的衰减速率存在差异,体现了平面内角度修正与法向二面角调节在动态过程中的分工协同机制。总体而言,3项误差均能稳定收敛且无明显振荡,表明所提出的角度误差反馈控制律能够在存在扰动与量测噪声的情况下保持良好的收敛性与鲁棒性,并持续提高角度一致性,从而保证无人机完成阵位部署。

图5展示了不同功率预算与速率门限下系统可调度用户数的等高线图。图中以色阶表示系统能够支持的用户数分布,横轴为总发射功率,纵轴为速率门限。可以看出,随着总功率的增加,系统可调度的用户数逐渐增多,尤其在较低的速率门限下,系统能够支持的用户数量显著增加。这表明,一方面功率预算的提升有助于系统有效增加服务的用户数量。另一方面,当速率门限提高时,系统可调度的用户数有所减少,因为更高的速率门限要求更高的传输速率,从而限制了用户数的增加。综上所述,所提出的算法在不同功率预算和速率门限条件下,能够有效优化系统的用户调度能力,并在保证通信质量的前提下最大化可服务用户的数量。

进一步地,图6给出了在总发射功率为-1 dBW、速率门限为 $0.8 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 时,概率LoS信道下可调度用户数随信道估计误差功率 σ_e^2 变化的结果。可以看出,在典型低空场景中较为常见的LoS主导传播条件下,系统在小估计误差区域内仍可维持较高的可调度用户数,说明所提方案在实际低空信道环境下具有良好的适应性与稳定性。尽管随着信道估计误差功率的增加,系统性能会出现一定下降,但当 κ_k 较大时,下降趋势相对平缓,反映出所提算法在较强LoS环境中具备一定的误差鲁棒性。相比之下,当 κ_k 较小时,由于NLoS成分占比上升,系统对估计误差更为敏感,可调度用户数下降更为明显。因此,该结果进一步说明,在正常低空信道和较高质量信道估计条件下,所提方法能够取得较为理想的用户调度效果。

5 结束语

本文聚焦GNSS拒止场景下低空无人机的任务执行问题,研究了无人机自主导航与多用户下行通信的一体化设计方法。在缺乏卫星导航支撑的条件下,设计了基于角度量测的导航策略,使无人机能够可靠抵达指定目标阵位。在此基础上,针对位置已知地面用户的下行传输需求,进一步设计了相应的资源分配与用户调度方案,以提升目标阵位处的服务能力。仿真结果表明,所提方法能够在仅依赖角度信息的

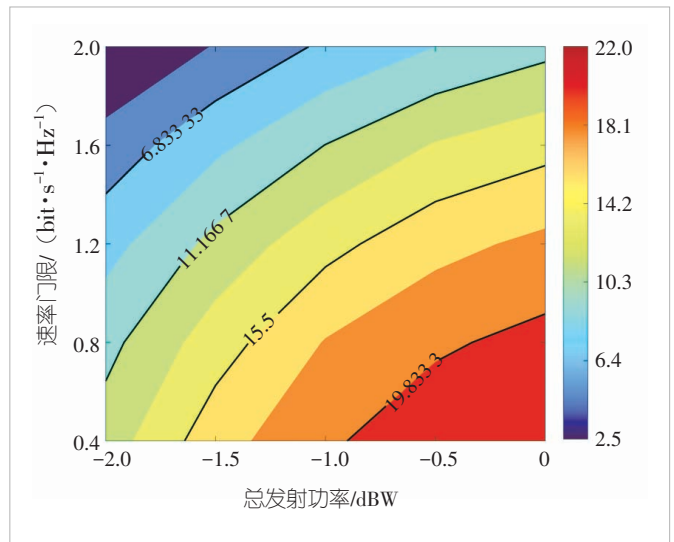


图5 不同功率预算与速率门限下的可调度用户数等高线图

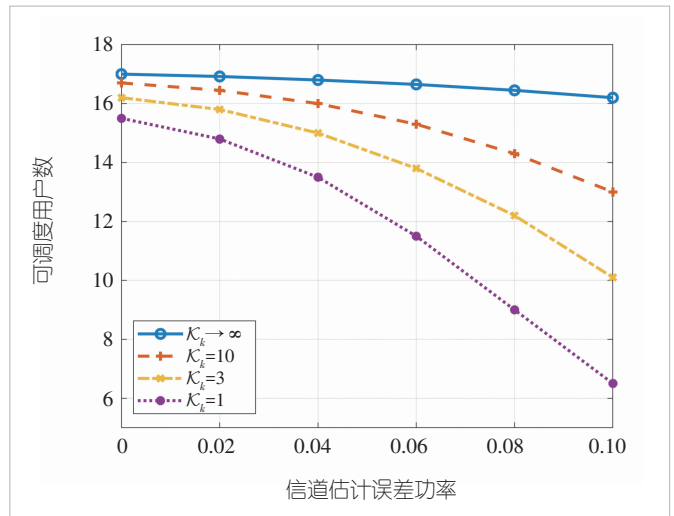


图6 概率视距/非视距信道下可调度用户数随信道估计误差功率的变化

条件下实现有效目标捕获,并在不同功率预算与速率门限下提升系统的用户调度性能。本文工作为GNSS拒止环境下无人机任务部署与通信服务提供了一种可行的解决思路。

参考文献

- [1] Yuan W J, Cui Y H, Wang J C, et al. From ground to sky: architectures, applications, and challenges shaping low-altitude wireless networks [PP/OL]. arXiv[2026-02-10]. <https://arxiv.org/abs/2506.12308>
- [2] Motlagh N H, Bagaa M, Taleb T. UAV-based IoT platform: a crowd surveillance use case [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55 (2): 128-134. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600587CM
- [3] Wu J, Yang Y Q, Yuan W J, et al. Low-altitude wireless networks: a comprehensive survey [PP/OL]. arXiv[2026-02-11]. <https://arxiv.org/abs/2509.11607>

- [4] Cui J J, Liu Y W, Nallanathan A. Multi-agent reinforcement learning-based resource allocation for UAV networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(2): 729–743. DOI: 10.1109/TWC.2019.2935201
- [5] Cai Y X, Wei Z Q, Li R D, et al. Joint trajectory and resource allocation design for energy-efficient secure UAV communication systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4536–4553. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2982152
- [6] Wu N, Wu J, Yuan W J, et al. SAGIN-oriented covert communications: joint robust beamforming and coverage optimization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2026, 44: 1903–1915. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3638305
- [7] Deng C L, Fang X M, Wang X B. Beamforming design and trajectory optimization for UAV-empowered adaptable integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(11): 8512–8526. DOI: 10.1109/TWC.2023.3264523
- [8] Kamat S U, Rasane K. A survey on autonomous navigation techniques [C]//Proceedings of Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC). IEEE, 2018: 1–6. DOI: 10.1109/ICAEECC.2018.8479446
- [9] Kassas Z M, Khairallah N, Khalife J J, et al. Aircraft navigation in GNSS-denied environments via radio SLAM with terrestrial signals of opportunity [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2024, 25(10): 14164–14182. DOI: 10.1109/TITS.2024.3405908
- [10] Marina De H G. Maneuvering and robustness issues in undirected displacement-consensus-based formation control [J]. IEEE transactions on automatic control, 2021, 66(7): 3370–3377. DOI: 10.1109/TAC.2020.3019780
- [11] Chen L M, Ruan R Z, Li J Q, et al. An angle-based control law for target location stabilization in 3-D space [J]. IEEE transactions on automatic control, 2026, 71(2): 1310–1317. DOI: 10.1109/TAC.2025.3613695
- [12] Mao W H, Lu Y, Pan G F, et al. UAV-assisted communications in SAGIN-ISAC: mobile user tracking and robust beamforming [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2025, 43(1): 186–200. DOI: 10.1109/JSAC.2024.3460065
- [13] Zhu J Y, Wang J H, Huang Y M, et al. On optimal beamforming

design for downlink MISO NOMA systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(3): 3008–3020. DOI: 10.1109/TVT.2020.2966629

作者简介



金海佳，南方科技大学在读硕士研究生；主要研究方向为低空无线网络、无线网络控制。



袁伟杰，南方科技大学助理教授（副研究员）、博士生导师；主要研究方向为通感一体化、车联网、低空无线网络通信、OTFS调制等。



伍军，南方科技大学在读博士研究生；主要研究方向为通感一体化、无人机通信。